

УДК 666.1.037.97

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-5-163-173

*В.В. ШЕХОВЦОВ, О.Г. ВОЛОКИТИН, Г.Г. ВОЛОКИТИН,
Н.К. СКРИПНИКОВА, П.В. БАЛОБАНОВ,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСФЕР НА ОСНОВЕ АГЛОМЕРАТОВ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ В ПОТОКЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ*

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований нагрева и плавления агломерированного порошка на основе отсевов кварцевого песка Туганского месторождения (Томская область) в потоке термической плазмы. Показано существенное влияние фазовых переходов на процесс нагрева и плавления агломерированных порошков в потоке термической плазмы, отсутствие учета которых может приводить к неоправданному нагреву частиц. Представлены результаты термохимических процессов, проходящих при нагреве. Установлено, что суммарная концентрация фаз, подвергнутых на начальном этапе испарению, на общем фоне рассматриваемой системы достаточно мала (0,13 масс. %). Предложена модель, описывающая формирование полых частицы на основе агломератов в потоке термической плазмы.

Ключевые слова: диоксид кремния; агломерат; нагрев; плавление; фазовые переходы; энергия термической плазмы.

Для цитирования: Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Балобанов П.В. Модель формирования микросфер на основе агломератов диоксида кремния в потоке термической плазмы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 5. С. 163–173.

*V.V. SHEKHOVTSOV, O.G. VOLOKITIN,
G.G. VOLOKITIN, N.K. SKRIPNIKOVA, P.V. BALABANOV,
Tomsk State University of Architecture and Building*

THE MODEL OF MICROSPHERE GENERATION FROM SILICON DIOXIDE AGGLOMERATES

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of thermal plasma heating and melting of agglomerated powder based on quartz sand screenings of the Tugan Deposit, Tomsk region, Russia. It is shown that phase transitions significantly affect the process of thermal plasma heating and melting of agglomerated powder, which can lead to unjustified heating of particles. The results of thermochemical processes due to heating are presented herein. It is found that the total concentration of phases subjected to evaporation at the initial stage, is rather small (0.13 wt.%). The model is proposed for the hollow particle formation from silicon dioxide agglomerates.

Keywords: silicon dioxide; agglomerate; heating; melting; phase transformation; thermal plasma; energy.

For citation: Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Balabanov P.V. Model" formirovaniya mikrosfer na osnove aglomeratov

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-48-703004 p_мол_a.

dioksida kremniya v potoke termicheskoj plazmy [The model of microsphere generation from silicon dioxide agglomerates]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 5. Pp. 163–173.

На сегодняшний день отмечается стремительное развитие области конструкционных материалов и покрытий, основывающихся на введении в исходную матрицу различных по своей структуре продуктов, представленных, в частности, нано- и микроразмерными сферическими частицами [1–3]. Получение нано- или микроразмерных частиц сферической формы, замыкающих в своей оболочке газовую часть (полная частица) распределенной как в одно целое, так и скооперированными отдельными включениями внутри частиц, можно достичь как с использованием обработки прекурсоров [4–6], так и обработки различных видов порошков с объемно развитой структурой [7–9]. В обоих случаях можно наблюдать нагрев (плавлением) конденсированной фазы до образования целевого продукта.

Время протекания фазовых переходов в оксидных системах зависит исключительно от технологических параметров нагревательных аппаратов. Каждый процесс нагрева и плавления способствует переходу вещества в различные агрегатные состояния с протеканием фазовых переходов, однако для достижения конечного продукта не всегда понятно, как именно влияют фазовые переходы на время протекания реакций. Наблюдать и контролировать фазовые переходы можно исключительно методами планирования, моделирования и статистического анализа конкретных оксидных систем. В большинстве физических моделей в качестве исходных характеристик сырья используют начальные модификации. При дальнейшем нагреве и достижении расплавленного состояния не учитывают фазовые переходы, которые могут насчитывать десятки видов (в зависимости от сырья). Таким образом, одной из поставленных задач работы является рассмотрение влияния фазовых переходов на процесс нагрева и плавления агломерированных частиц в потоке термической плазмы. При этом ключевой задачей настоящей работы является создание адекватной модели формирования полых частиц на основе агломератов в потоке термической плазмы.

Для проведения теоретической и экспериментальной работы в качестве сырья выбран отсев кварцевого песка Туганского месторождения [10, 11]. Данный вид сырья характеризуется высоким содержанием диоксида кремния (98–99,2 масс. %). В качестве примесей в составе отсева кварцевого песка находятся тугоплавкие оксиды (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2), но их процентная масса несущественно меньше одного процента.

Нагрев и плавление приготовленного агломерированного порошка на основе отсева кварцевого песка осуществлялся на электроплазменном стенде [11]. Использование высокоэнергетической среды обосновано достаточно большими энергетическими связями между структурными единицами в кристаллической решетке оксидных материалов, что сказывается на высокой температуре плавления (1993 К). На рис. 1 представлена фотография процесса обработки агломерированного порошка при стационарном режиме работы электроплазменного стенда (сила тока 250 А, напряжение 110 В, расход

транспортирующего и плазмобразующего газа 0,4 и 1,1 г/с соответственно, расход порошка 2,2 кг/ч).

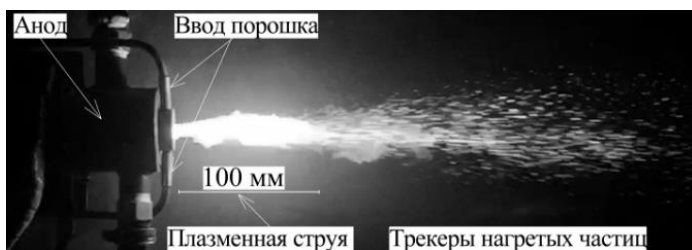


Рис. 1. Фотография процесса обработки агломерированного порошка на основе отсевов кварцевого песка Туганского месторождения

Рассматривая процесс нагрева и плавления оксидных систем, стоит начать с анализа цепочки фазовых переходов и изменения теплофизических свойств конденсированной фазы в процессе нагрева. Обычно при постановке математических задач используется допущение о «равномерном по объему частицы» или «безградиентном» нагреве, однако при рассмотрении частиц оксидных материалов с низкой теплопроводностью, тем более пористых, оно является необоснованным. Для сферических частиц в условиях конвективного теплообмена с газовым потоком такое предположение оправданно при значениях числа Био $Bi \sim \lambda_{\text{газа}}/\lambda_{\text{частицы}} \ll 1$. В таком случае нет необходимости в каждый момент времени вычислять распределение температуры по объему капли, решая уравнение теплопроводности, а можно использовать среднемассовую температуру частицы. Однако для керамической частицы число $Bi \sim 1$, что приводит к более высокой температуре поверхности и снижению теплового потока со стороны газа [12].

Для эффективной оценки свойств агломерированного диоксида кремния в процессе фазовых переходов произведем оценку теплофизических характеристик с учетом исходной пористости частиц. Для учета коэффициента теплопроводности использовалось соотношение Максвелла – Эймана [13]. Плотность пористых частиц находилась по соотношению $\rho_p = \rho_m(1 - \Pi)$, где ρ_p – плотность пористой частицы; ρ_m – плотность материала частиц. В частности, для удельной теплоемкости частиц использовалось соотношение

$$c_p = \begin{cases} 29,3T_p^{0,56}, & T_p < 600 \text{ К}, \\ 983 + 0,15T_p, & T_p \geq 600 \text{ К}, \end{cases}$$

где $[c_p] = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $[T_p] = \text{К}$.

В таблице представлены теплофизические характеристики диоксида кремния в процессе протекания фазовых переходов, также в скобках приведены результаты для частиц пористостью $\Pi = 40 \%$. Температурная область устойчивости – T , плотность – ρ , теплоемкость – c , теплопроводность – λ .

Из табличных данных видно, что приведенные характеристики изменяются при фазовых переходах. Плотность и теплопроводность конденсированной фазы в процессе нагрева снижается на 17,3 и 48,9 % соответственно. Теплоемкость

увеличивается на 39 %. Таким образом, неучет фазовых переходов может приводить к существенному завышению численных показателей при расчете динамики движения и нагрева агломерированных частиц в потоке термической плазмы.

Теплофизические характеристики диоксида кремния при фазовых переходах

Модификация	T , К	ρ , кг/м ³	c , Дж/кг	λ , Вт/м·К
β -кварц	300–846	2650 (1590)	714,5→1109,9 (830,7→1067,9)	14,3→8 (7,2→4,0)
α -кварц	846–1043	2530 (1518)	1109,9→1139,5 (1067,9→1085,7)	8→7 (4,0→3,5)
α -тридимит	1043–1743	2220 (1332)	1139,5→1244,4 (1085,7→1148,6)	7→7 (3,5→3,5)
α -кристобалит	1743–1993	2190 (1314)	1244,4→1281,9 (1148,6→1171,1)	7→7 (3,5→3,5)

В работе «Моделирование процесса получения полых частиц кремнезема в плазменном потоке»¹ предложена модель, позволяющая путем проведения параметрических расчетов выбрать геометрические и режимные параметры электроплазменной установки, обеспечивающие требуемую динамику нагрева и плавления частиц. Скорость u_p , температура T_p и доля расплавленной массы φ пористой частицы находятся из численного решения системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = C_D \frac{\pi D_p^2 \rho_g (T_f) |u_f - u_p| (u_f - u_p)}{4m_p}; \\ \frac{dT_p}{dt} = \frac{\pi D_p}{c_p m_p} \lambda_g \text{Nu} (T_f - T_{melt}); \\ \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\pi D_p}{L m_p} \lambda_g \text{Nu} (T_f - T_{melt}), \end{cases}$$

где T_f и u_f – локальная температура и скорость несущей среды (плазма); ρ_g , λ_g – плотность и теплопроводность несущей среды; C_D – коэффициент сопротивления; D_p , m_p , c_p – диаметр, масса и теплоемкость частицы; T_{melt} – температура плавления кристаллической модификации материала.

Примем допущение, что при достижении температуры фазового перехода параметры λ_p , ρ_p и c_p меняются скачком и находятся постоянными в области устойчивости данной модификации. В качестве максимальной величины теплоты плавления SiO_2 примем $Q_{melt} = 186,6$ кДж/кг, данное значение является суммой теплоты плавления кристаллической модификации вблизи тройной точки и суммы теплот фазовых переходов при изменении модифика-

¹ Архипов В.А., Бондарчук С.С., Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Аньшаков А.С., Кузьмин В.И. Моделирование процесса получения полых частиц кремнезема в плазменном потоке. Часть 1. Динамика движения и нагрева пористых частиц. Теплофизика и аэромеханика [в печати].

ций кристаллической структуры по мере повышения температуры в диапазоне 390–1993 К [14].

На рис. 2 представлена динамика нагрева и плавления частиц диоксида кремния без учета и с учетом фазовых переходов.

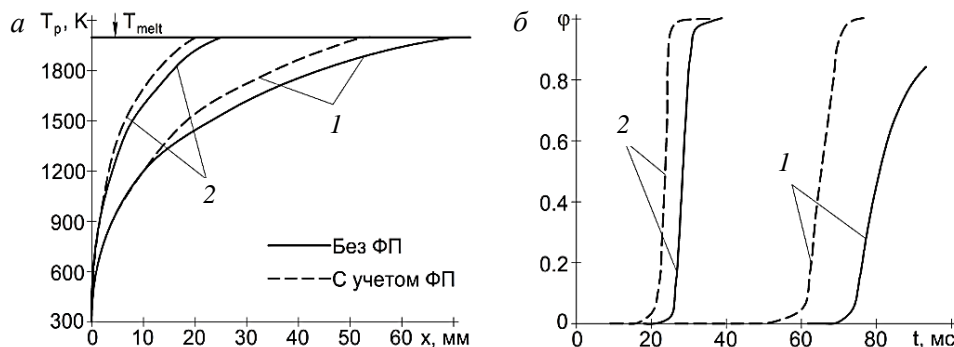


Рис. 2. Динамика нагрева и плавления частиц диоксида кремния диаметром 300 мкм: *a* – зависимость температура частицы от пройденного пути; *б* – зависимость образования расплавленной массы частицы от пройденного пути; 1 – беспористая частица; 2 – частицы пористостью 0,4

Как видно из рис. 2, *a*, основной нагрев частиц осуществляется на расстоянии 20 мм от выходного сечения сопла плазмотрона, данный участок плазменной струи представлен в виде ядра, где температура и скорость воздушно-плазменной струи слабо изменяются. Однако из рис. 2, *б* видно, что неучет фазовых переходов приводит к занижению численных показателей формирования расплавленной массы частицы. Таким образом, можно говорить, что отсутствие учета фазовых переходов может приводить к неоправданному перегреву частиц.

Для проведения расчетов экзотермических реакций при тепловом воздействии на силикатные системы необходимо учитывать их полные энтальпии. Результаты расчета полной энтальпии (ΔH) для соединений приведены на рис. 3, *a*. Маркерами на этом графике указаны соединения, которые входят в состав многофазного высококремнеземистого материала.

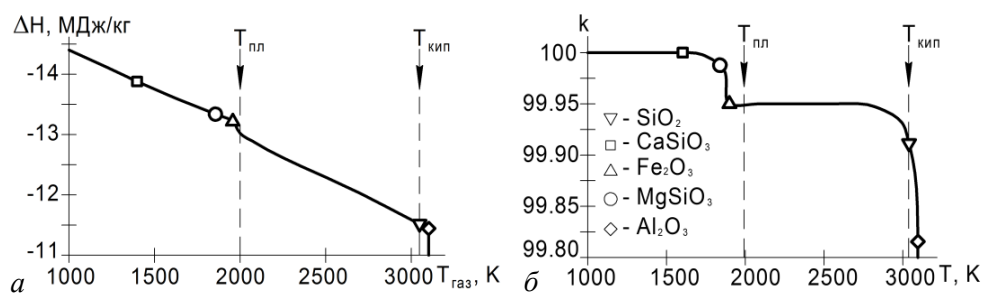


Рис. 3. Термохимические процессы в многокомпонентной оксидной системе: *a* – результаты расчета полной энтальпии, необходимой для проведения термохимических процессов; *б* – теоретически рассчитанная зависимость от температуры содержания многофазного материала в конденсированном состоянии

На рис. 3, б представлены результаты моделирования термохимических процессов в рассматриваемой многокомпонентной системе до температур плавления и газообразования. На кривой зависимости содержания многофазного материала в конденсированном состоянии (k) соответствующими маркерами отмечены точки, показывающие переход из твердого состояния в газообразные фазы SiO_2 , CaSiO_3 , Fe_2O_3 , MgSiO_3 и Al_2O_3 .

Силикатным материалам присуще содержание характерных фаз, которые могут образовываться или существовать исключительно при высоких температурах в процессе нагрева и в предплавильных областях. К таким фазам можно отнести силикат кальция (CaSiO_3) и метасиликат магния (MgSiO_3). Здесь важно обратить внимание, что данные фазы нестабильны при интенсивном нагреве. На основе анализа термодинамических данных установлено, что часть конденсированного материала в процессе нагрева исследуемой оксидной системы переходит в газообразное состояние, в то время как основная масса материала не успевает достичь температуры плавления (1993 К). Также часть конденсированного материала, представленного в виде оксида железа (Fe_2O_3), переходит в газообразное состояние. Однако суммарная концентрация фаз, подвергнутых на начальном этапе испарению, на общем фоне рассматриваемой системы достаточно мала (0,13 масс. %), что отражено на рис. 3, б. Тем не менее пренебрегать при рассмотрении нагрева данными фазами является нецелесообразным, что может привести к завышению численных показателей температурного диапазона нагрева.

Таким образом, частицы порошка в твердом состоянии достигшие высоких температур, близких к температуре плавления, в потоке плазмы в основном состоят из диоксида кремния (SiO_2) со следами оксида алюминия (Al_2O_3). Как показано в исследовании [15], такой фазовый состав приводит к более высоким физико-механическим параметрам готовых полых порошковых материалов.

На основе анализа численных исследований и термохимических расчетов предложена физическая модель образования полых керамических микросфер на основе SiO_2 в потоке термической плазмы. На рис. 4 схематически представлена физическая модель образования полых микросфер при нагреве агломерированных частиц SiO_2 в потоке термической плазмы.

Проведем на качественном уровне поэтапное описание процесса превращения агломерированных частиц в потоке термической плазмы в полые микросферы.

Первый этап. Первый этап начинается с нагрева частиц от начальной комнатной температуры T_0 до высоких температур, соизмеримых с температурой плавления $T_{\text{пл}}$ материала. Этот нагрев проходит за очень короткий промежуток времени и будет зависеть от времени выравнивания температуры в объеме пористой частицы. На этом этапе газ, содержащийся в порах агломерированных частиц, нагревается, расширяется и выходит из частиц через открытые поры. Поскольку давление газа внутри частицы в процессе нагрева возрастает, то на первом этапе возможны разные сценарии процессов.

Первый сценарий реализуется тогда, когда поры сообщаются с внешней средой на протяжении всего процесса нагрева. В этом случае давление в по-

рах незначительно отличается от давления окружающей среды, и при этом размеры частиц остаются практически постоянными.

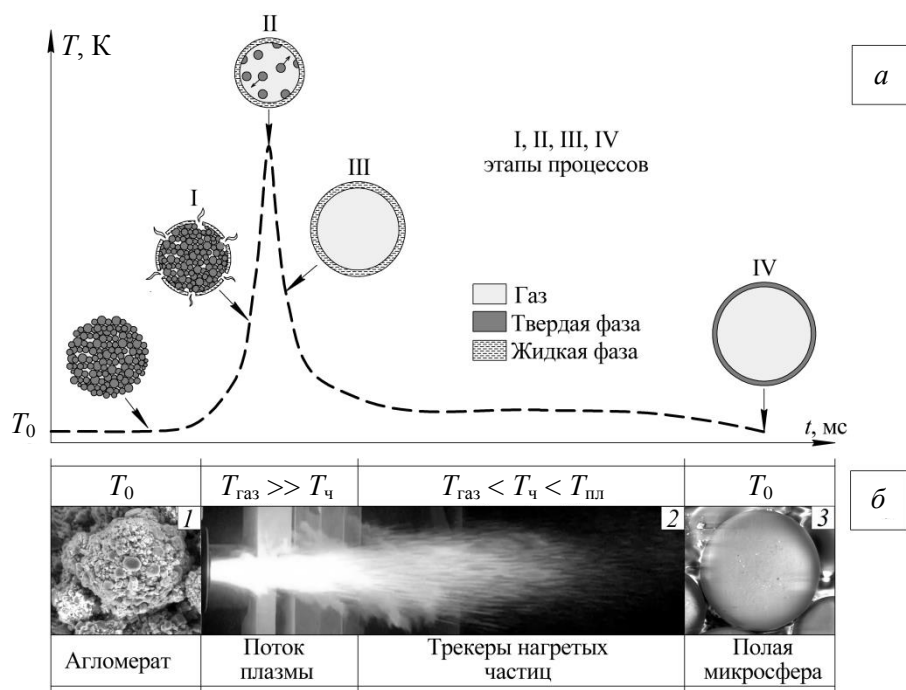


Рис. 4. Физическая модель образования полых микросфер при нагреве агломерированных частиц SiO_2 при высокоскоростном нагреве до высоких температур в потоке термической плазмы:
a – схематическое представление превращений исходных частиц в микросферы при нагреве в потоке плазмы (штриховой линией показана временная зависимость температуры в плазменном потоке); *б* – экспериментально наблюдаемые частицы в исходном (1) и конечном (3) состояниях до и после прохождения в потоке плазмы (2) соответственно

Второй сценарий разворачивается, когда все поры являются замкнутыми и сообщение с внешней средой заблокировано. Тогда давление в порах начинает возрастать и будет заметно выше давления окружающей среды.

Третий сценарий будет реализован в том случае, когда в частицах часть пор являются открытыми, а часть замкнутыми. Тогда с ростом давления закрытые поры могут стать открытыми.

Второй этап. Этот этап начинается при достижении частицами температур, близких к температурам плавления высококремнеземистого материала. В зависимости от того, какой сценарий реализовался в процессе нагрева на первом этапе, возможно протекание разных процессов на втором этапе. Для авторов работы представляет интерес только первый сценарий, который реализуется на первом этапе. Поскольку именно при таком развитии событий возможно образование полых микросфер. Рассмотрим детально последовательность процессов, приводящих к образованию полых керамических микросфер. В начале

этого этапа при разогреве высококремнеземистого материала до температур плавления происходит процесс формирования первичной внешней оболочки. Эта первичная оболочка представляет собой жидкий расплав высококремнеземистого материала, который образовался в результате расплавления гетеродисперстных частиц. Образование жидкой оболочки приводит к капсулированию некоторой массы газа. Этот газ, как было показано ранее, при нагреве оксидной системы выделяется при переходе силиката кальция (CaSiO_3) и метасиликата магния (MgSiO_3) в газообразное состояние. Одновременно с этим идет процесс фазового перехода из твердого состояния в жидкий материал внутри самой пористой агломерированной частицы. В результате расплавленного материала внутри частицы под действием давления газа и поверхностного натяжения осаждаются на внутренней поверхности жидкой оболочки.

Третий этап. На этом этапе заканчивается процесс формирования жидкой оболочки керамических полых микросфер. Дальнейший нагрев частицы с жидкой оболочкой выше температуры плавления материала до конечной температуры T_k способствует дальнейшему повышению давления газа во внутренней полости частицы. Процесс роста давления газа внутри частицы с жидкой оболочкой будет приводить к увеличению диаметра полый частицы и уменьшению толщины ее оболочки. При этом значение конечной температуры не должно превышать температуру испарения $T_k < T_{\text{исп}}$.

Четвертый этап. Этот этап является заключительным, и на нем происходит быстрое понижение температуры частиц. Такое быстрое понижение температуры приводит к переходу оболочки полых микросфер из жидкого аморфного состояния в твердое аморфное состояние.

В заключение необходимо отметить особенность процессов, протекающих в результате движения пористых частиц в потоке термической плазмы. В основе представленной модели образования полых микросфер лежит предположение, что основным газом, который находится внутри пористых частиц, является воздух, тогда как масса газа, выделяющегося при нагреве в результате сублимации оксидных фаз материала частицы, значительно меньше массы воздуха, присутствующего в порах агломерата. Достоверность этого предположения следует из установленного экспериментально факта, что одним из определяющих факторов образования керамических полых микросфер при высокоскоростном нагреве в потоке плазмы является исходная пористость частиц порошка.

Заключение

Установлено, что воздействие термической плазмы на агломерированные порошки на основе SiO_2 при определенных условиях приводит к образованию полых микросфер, близких к идеальной сферической форме. На основе численных исследований и анализа результатов термодинамического моделирования предложена физическая модель для описания процессов, протекающих в частицах порошка при их прохождении в потоке термической плазмы. В предложенной физической модели основные процессы структурированы в виде четырех основных этапов. Такой подход позволил описать особенности процессов, происходящих в агломерированных порошковых высококремнеземистых материалах в плазменном потоке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sreekumar K. P., Saxena S. K., Kumar Yogendra, Thiyagarajan T. K., Dash Ashutosh, Ananthapadmanabhan P. V., Venkatesh Meera. Studies on the preparation and plasma spherodization of yttrium aluminosilicate glass microspheres for their potential application in liver brachytherapy // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2010. V. 208. P. 012117.
2. Xu Wei, Wang Tao, He Zhibing, Wu Zhangwen. Fabrication of hollow glass microspheres for inertial confinement fusion targets by depolymerizable mandrel method // *High Power Laser and Particle Beams.* 2015. V. 27. № 6. P. 062008.
3. Semenov V., Rozovskaya T., Oreshkin D. Properties of the dry masonry mixtures with hollow ceramics microspheres // *Advanced Materials Research.* 2014. V. 860. P. 1244–1247.
4. Левицкий В.С., Максимов А.И., Мошников В.А., Теруков Е.И. Исследование структуры и состава пленочных золь-гель-систем $\text{CoO}_x\text{-SiO}_2$ // *Физика твердого тела.* 2014. Т. 56. № 2. С. 270–275.
5. Arkhipov V.A., Kozlov E.A., Zharova I.K., Titov S.S., Usanina A.S. Evolution of a liquid-drop aerosol cloud in the atmosphere // *Arabian Journal of Geosciences.* 2016. V. 9. № 2. P. 1–10.
6. Жуков А.С., Архипов В.А., Бондарчук С.С., Гольдин В.Д. Оценка морфологии частиц при плазмохимическом синтезе керамических порошков // *Химическая физика.* 2013. Т. 32. № 12. С. 52–58.
7. Solonenko O.P., Gulyaev I.P., Smirnov A.V. Thermal plasma processes for production of hollow spherical powders: theory and experiment // *Journal of Thermal Science and Technology.* 2011. V. 6. № 2. P. 219–234.
8. Гуляев И.П. Особенности получения и обработки полых частиц диоксида циркония в пламенных потоках // *Вестник Югорского государственного университета.* 2009. Вып. 2 (13). С. 10–22.
9. Bessmertnyj V.S., Krokhin V.P., Lyashko A.A., Drizhd N.A., Shekhovtsova Zh.E. Preparation of glass microspheres by plasma spraying // *Steklo i Keramika.* 2001. V. 8. P. 6–7.
10. Абзаев Ю.А., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Об исследованиях по использованию плазменной технологии при получении кварцевой керамики. Часть 1. Анализ кварцевого песка // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* 2014. № 5. С. 108–113.
11. Пат. 2664287, Российская Федерация. Устройство для получения микросфер и микрошариков из оксидных материалов / В.В. Шеховцов, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин, В.К. Чибирков. № 2017114900; заявл. 14.09.2016; опубл. 16.08.2018, Бюл. № 23.
12. Pfender E., Lee Y. C. Particle dynamics and particle heat and mass transfer in thermal plasmas. Part I. The motion of a single particle without thermal effects // *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 1985. V. 5. № 3. P. 211–237.
13. Wang M., Pan N. Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials // *Materials Science and Engineering R.* 2008. V. 63. P. 1–30.
14. Власов В.А., Волокитин О.Г., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Шеховцов В.В. Расчет процесса плавления частицы кварца в условиях низкотемпературной плазмы // *Инженерно-физический журнал.* 2016. Т. 89. № 1. С. 143–147.
15. Шеховцов В.В., Власов В.А., Волокитин Г.Г., Волокитин О.Г. Использование низкотемпературной плазмы для получения зольных микросфер // *Известия вузов. Физика.* 2016. Т. 59, № 9-3. С. 305–308.

REFERENCES

1. Sreekumar K.P., Saxena S.K., Kumar Yogendra, Thiyagarajan T.K., Dash Ashutosh, Ananthapadmanabhan P.V., Venkatesh Meera. Studies on the preparation and plasma spherodization of yttrium aluminosilicate glass microspheres for their potential application in liver brachytherapy. *Journal of Physics: Conference Series.* 2010. V. 208. Pp. 012117.
2. Xu Wei, Wang Tao, He Zhibing, Wu Zhangwen. Fabrication of hollow glass microspheres for inertial confinement fusion targets by depolymerizable mandrel method. *High Power Laser and Particle Beams.* 2015. V. 27. No. 6. Pp. 062008.

3. *Semenov V., Rozovskaya T., Oreshkin D.* Properties of the dry masonry mixtures with hollow ceramics microspheres. *Advanced Materials Research*. 2014. V. 860. Pp. 1244–1247.
4. *Levitsky V.S., Maksimov A.I., Moshnikov V.A., Terukov E.I.* Issledovaniye struktury i sostava plenochnykh zol'-gel'-sistem $\text{CoO}_x\text{-SiO}_2$ [Structure and composition of $\text{CoO}_x\text{-SiO}_2$ film sol-gel systems]. *Solid State Physics*. 2014. V. 56. No. 2. Pp. 270–275. (rus)
5. *Arhipov V.A., Kozlov E.A., Zharova I.K., Titov S.S., Usanina A.S.* Evolution of a liquid-drop aerosol cloud in the atmosphere. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016. V. 9. No. 2. Pp. 1–10.
6. *Zhukov A.S., Arhipov V.A., Bondarchuk S.S., Goldin V.D.* Otsenka morfologii chastits pri plazmokhimicheskom sinteze keramicheskikh poroshkov [Estimation of particle morphology during plasma-chemical synthesis of ceramic powders]. *Khimicheskaya fizika*. 2013. V. 32. No. 12. Pp. 52–58. (rus)
7. *Solonenko O.P., Gulyaev I.P., Smirnov A.V.* Thermal plasma processes for production of hollow spherical powders: theory and experiment. *Journal of Thermal Science and Technology*. 2011. V. 6. No. 2. Pp. 219–234.
8. *Gulyaev I.P.* Osobennosti polucheniya i obrabotki polykh chastits dioksida tsirkoniya v plazmennykh potokakh [Production and processing of hollow particles of zirconium dioxide in plasma flows]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2009. No. 2 (13). Pp. 10–22. (rus)
9. *Bessmertnyj V.S., Krokhin V.P., Lyashko A.A., Drizhd N.A., Shekhovtsova Zh.E.* Preparation of glass microspheres by plasma spraying. *Glass and Ceramics*. 2001. V. 8. Pp. 6–7.
10. *Abzayev Yu.A., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V.* Ob issledovaniyakh po issledovaniyakh po ispol'zovaniyu plazmennoy tekhnologii pri poluchenii kvartsevoy keramiki. Chast' 1. Analiz kvartsevogo peska [Plasma treatment of quartz ceramics. part 1. silica sand analysis]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 5. Pp. 108–113. (rus)
11. *Shekhovtsov V.V., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Chibirkov V.K.* Ustroystvo dlya polucheniya mikrosfer i mikrosharikov iz oksidnykh materialov [A device for producing microspheres and microbeads from oxide materials]. Pat. Rus. Fed. N 2664287. 2018. (rus)
12. *Pfender E., Lee Y.C.* Particle dynamics and particle heat and mass transfer in thermal plasmas. Part I. The motion of a single particle without thermal effects. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 1985. V. 5. No 3. Pp. 211–237.
13. *Wang M., Pan N.* Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials. *Materials Science and Engineering R*. 2008. V. 63. Pp. 1–30.
14. *Vlasov V.A., Volokitin O.G., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Shekhovtsov V.V.* Raschet protsessa plavleniya chastitsy kvartsa v usloviyakh nizkotemperaturnoy plazmy [Melting process calculation of quartz particle under low-temperature plasma conditions]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2016. V. 89. No. 1. Pp. 143–147. (rus)
15. *Shekhovtsov V.V., Vlasov V.A., Volokitin G.G., Volokitin O.G.* Ispol'zovaniye nizkotemperaturnoy plazmy dlya polucheniya zol'nykh mikrosfer [Low-temperature plasma in production of ash microspheres]. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*. 2016. V. 59. No. 9-3. Pp. 305–308. (rus)

Сведения об авторах

Шеховцов Валентин Валерьевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shehovcov2010@yandex.ru

Волокитин Олег Геннадьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, volokitin_oleg@mail.ru

Волокитин Геннадий Георгиевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, volokitin_oleg@mail.ru

Скрипникова Нелли Карповна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nks2003@mail.ru

Балобанов Павел Валериевич проректор по административно-хозяйственной деятельности, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, axu@tsuab.ru

Authors Details

Valentin V. Shekhovtsov, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru

Oleg G. Volokitin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, volokitin_oleg@mail.ru

Gennadii G. Volokitin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, volokitin_oleg@mail.ru

Nelli K. Skripnikova, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nks2003@mail.ru

Pavel V. Balobanov, Vice-Rector for administration and maintenance activity, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, axu@tsuab.ru